

管路点検のための空圧駆動型柔軟索状ロボットに関する研究

| | |
|--------|---|
| 著者 | 山本 知生 |
| 号 | 63 |
| 学位授与機関 | Tohoku University |
| 学位授与番号 | 情博第690号 |
| URL | http://hdl.handle.net/10097/00127263 |

| | |
|---------|---|
| 氏名 | やまもと ともなり 山 本 知 生 |
| 学位の種類 | 博士(情報科学) |
| 学位記番号 | 情博第690号 |
| 学位授与年月日 | 平成31年3月27日 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第1項該当 |
| 研究科、専攻 | 東北大学大学院情報科学研究科(博士課程)応用情報科学専攻 |
| 学位論文題目 | 管路点検のための空圧駆動型柔軟索状ロボットに関する研究 |
| 論文審査委員 | (主査) 東北大学教授 田所 諭 東北大学教授 橋本 浩一 東北大学教授 小菅 一弘 (工学研究科) 東北大学准教授 昆陽 雅司 |

論文内容の要旨

第1章 序論

我が国において、配管インフラや配管設備の多くは高度経済成長期に整備され、経年による老朽化の進行に伴い内部状態の点検が必要となっている。しかし、配管の多くは地中や高所などに設置されているため、点検のために交通規制を行ったり足場を組んだりする必要があり、莫大なコストや長い点検時間が必要になることが問題となっている。自走型のロボットにより配管内部の点検作業を効率化することで飛躍的なコスト削減をもたらすと期待されている。

配管内を検査するためのロボットには細い配管にも対応できる小径性、迅速に検査するための高速性、垂直管や曲管の通過性、防爆性を同時に満たすことが求められる。しかし、配管内部の狭隘性がロボットの推進機構に課す制約は非常に大きく、既存の機構では100mm以下の配管内においてこれら要件を満たすことが非常に困難であり、新たなコンセプトに基づく推進機構が必要である。

そこで、本研究では小径配管内を始めとした狭隘な環境下にて運用可能な新たな索状ロボットシステムを創出することを目的とする。従来の推進手法に存在する課題を解決する新たな索状体推進機構、実配管におけるロボットの走行性能を向上させる推進機構と動作計画、および小径配管が接続する大空間設備の同一機構による走行を実現する推進手法の研究を通して、目的の実現に取り組む。

第2章 柔軟直動アクチュエータを用いた管路内高速推進機構の提案

本章では小径性、高速性、垂直管および曲管の走行性、防爆性を両立する配管ロボットを実現するために新たな推進手法を提案し、提案する推進手法を実現するためのアクチュエータを開発した。

まず、従来の推進手法の課題を解決しスライディング・インチワーム運動による推進様式を提案した。この運動様式は1サイクルあたりの推進距離を従来に比べて大幅に延長できるため、推進速度を飛躍的に向上することができる。そして、スライディング・インチワーム運動によるロボットを実現するために、直動型の空圧アクチュエータであるE-PHSアクチュエータを提案し、力学モデルを構築した。E-PHSアクチュエータは柔保持力生成ユニットの直動運動と保持力発生の切り替えを印加圧

力の圧力差によってコントロールすることができる。さらに、E-PHS アクチュエータを用いたスライディング・インチワーム運動に基づいた 2 種類の配管内推進運動パターンを提案し、推進速度や空気消費量の観点から両者を比較した。

続いて、E-PHS アクチュエータの特性評価実験を実施した。実験より、最大 13.4 N の保持力と最大 18.9 N の押出し力が発生可能であることを確認するとともに、力学モデルを用いて保持力生成に必要な印加圧力を決定した。また、押出し力が印加圧力の差圧に依存して線形に増加することを明らかにした。

さらに、アクチュエータの転がり抵抗の特性について詳細な検討を行った。転がり抵抗の測定実験より、転がり抵抗のローラ押し付け力依存性を明らかにするとともに、理論式へのフィッティングを通して転がり抵抗の主要因が弾性ヒステリシスであると結論づけた。また、結果をアクチュエータの力学モデルへ組み込むことで、半径 1.83 mm 以上のローラ径が適していることを明らかにした。

その後、試作したロボットを用いてロボット推進の確認とスライディング・インチワーム運動の評価を行った。内径 53 mm の配管内の走行実験を通して、水平配管内にて平均 100 mm/s という飛躍的な高速推進を達成するとともに、垂直配管やベンド管の走行も実現した。さらに、結果を用いて推進運動パターンのパラメータ同定により理論値と比較するとともに、推進速度向上のための方策を議論した。

第 3 章 管路内走行性能向上のための推進機構と動作計画

本章では、実配管におけるロボットの走行安定性の向上を目的として推進機構と動作計画手法の開発を行った。実配管で想定される汚れた走行環境での安定性向上を目指して新たな保持力発生機構を提案するとともに、曲管通過性の向上を目指して接触力低減構造と曲管通過動作を提案した。さらに、不可視状態での安定した自動推進の実現のために、アクチュエータ直動部の位置を推定する手法を提案した。

まず、汚れの存在する配管内走行時の走行性能の向上させるために、セルフロック現象を利用して保持力を発生する SLE ユニットを提案した。SLE ユニットは E-PHS アクチュエータの圧力差を利用して配管内で収納可能な金属ピンを展開することで大保持力を生成する事ができるとともに、曲管通過性を高めることができる。SLE ユニットの力学モデルの構築を通して機構の設計論を展開するとともに、金属ピンの展開に必要な印加圧力を定式化した。

SLE ユニットに対しては種々の評価実験が行われた。実験を通して反力特性や圧力印加による圧縮長の特性を明らかにするとともに、最大 69.7 N の保持力（従来比 5.2 倍）が発生可能であることを確認し、保持力生成に必要な最低印加圧力が 283 kPa であると決定した。最後に SLE ユニットを用いた配管内の走行実験により、従来機構では走行困難であった垂直管やエルボ管での安定走行や水分や錆、油分の存在する悪環境配管での安定走行を確認した。

続いて、曲管通過性の向上を目的に、管壁接触力を低減する SLE ユニットの構造と曲管通過動作を提案した。SLE ユニットの曲管通過実験を通して、SLE ユニットと管壁との間に発生する接触力が曲管の通過性を低下させる要因であることを明らかにした。これを踏まえて、弾性要素を用いた接触力低減構造と曲管通過動作を組み合わせることで接触力を低減し曲管通過を実現する手法を提案した。圧縮ばねにより構成されたガイドを SLE ユニットに搭載することで管壁への接触力を約 38% 低減できることを明らかにするとともに、曲管通過時にアクチュエータを脱力状態にする動作を組み合わせることで曲管通過が実現できることを実験より明らかにした。

最後に、不可視状態での自動推進の実現や曲管通過動作の自動生成の実現のために、SLE ユニットの位置推定手法を開発した。提案手法は印加する圧力と流量の情報を元に静的モデルを用いて位置の推定を試みるもので、実用的精度で SLE ユニットの位置を推定することが可能である。アクチュエータ単体での位置推定実験により最大誤差 0.11 m でリアルタイム推定が可能であり、誤差が実用に耐えうる範囲であることを確かめた。また、位置推定を用いたロボット推進動作の自動生成を実現し、直管内での自動走行を実現した。

第4章 回転アクチュエータを用いた管路外走行の実現

本章では、小径配管が接続する大口径配管やタンク等の大空間を含む設備点検の実現を目指して、小径配管内とオープンスペースを同一機構により走行するロボットを提案した。新たな索状ロボットのコンセプトおよび移動手法を提案するとともに、アクチュエータの新規開発を通してコンセプトの実現に取り組んだ。

まず、前章までに提案した索状ロボットの平面上での推進可能性について実験を通して検討し、検討結果を踏まえて小径配管内とオープンスペースを同一機構で走行する柔軟索状ロボットの新たなコンセプトを提案した。提案ロボットは推進力発生部と操舵力発生を分離した構成になっており、推進力発生部として SLE ユニットのアクチュエータを装備した E-PHS アクチュエータを用い、また操舵力発生部として回転運動を生成するアクチュエータを用いることで小径性を確保しつつ走行範囲の拡大を可能にしている。

続いて、操舵力発生部として用いるための空圧回転アクチュエータを提案した。この回転アクチュエータは中空のインナーシャフトとアウターロータによって構成され、空気の印加による柔軟チューブの膨張力を回転力に変換することでアウターロータの回転力を生成することができる。試作機を用いた評価により、220 kPa 印加時に最大 89.6 mN・m のトルクを発生でき、トルクが印加圧力に比例することを明らかにした。また、印加流量 16.5 L/min の時に最大 1300 rpm を発生できることを確認するとともに、回転数が印加流量と比例関係にあることを明らかにした。

その後、提案コンセプトに基づいたロボット試作機を製作して推進性能の確認を行った。オープンスペースでの推進力と操舵力の走行面依存性を調べ、グレーチングやコンクリート上などにおいてより大きな推進力と操舵力が発生できることを明らかにした。また、リノリウム床のような滑らかな走行面では発生力が小さくなるが、走行が見込めることを確認した。さらに、ロボット試作機による配管内とオープンスペース推進実験も行われた。地上 200 mm の配管内からリノリウム床に着地し、オープンスペース上を任意の地点に向かってシームレスに推進できることを確認し、提案コンセプトによるロボットの実現可能であることを裏付けた。また、より細かな推進制御のために回転アクチュエータの減速機搭載が必要となることや、ロボットの姿勢が回転アクチュエータと E-PHS アクチュエータの双方が連続体の運動に影響を与えていることを考察した。

最後に、提案ロボット利点と限界、展望について議論した。提案ロボットにより検査範囲の拡大が見込めるだけでなく、福島第一原子力発電所の格納容器・压力容器内部の調査においても活用できる可能性があることを述べた。一方で、推進力や操舵力の走行環境依存性や推進時のロボット姿勢の把握に課題があることを述べ、その解決策を議論した。さらに、少ない自由度のアクチュエータの組み合わせにより生成されるロボットの多彩な索状体姿勢の解明が、ロボットの性能向上に繋がるとともに、新たな学術領域の萌目となり得ることを述べた。

第5章 結論

本研究では、管路内の点検を主眼として狹隘空間に適用できる索状ロボットシステムを開発した。本研究を通して開発された配管内推進技術は、小径配管内での高速な推進を実現するものであり、従来困難であった小径配管や設備の迅速な点検を実現できると期待される。また、ロボットの開発を通して提案された様々な要素技術は、他のロボットや工業設備のアクチュエータ機構および動作手法としての応用も期待される。

論文審査結果の要旨

我が国において、配管インフラや配管設備の多くは高度経済成長期に整備され、経年による老朽化の進行に伴い内部状態の点検が必要となっている。しかし、配管の多くは地中や高所などに設置されているため、点検のために交通規制を行ったり足場を組んだりする必要があり、莫大なコストや長い点検時間が問題となっている。自走型のロボットにより配管内部の点検作業を効率化することで飛躍的なコスト削減をもたらすと期待されている。

配管内を検査するためのロボットには細い配管にも対応できる小径性、迅速に検査するための高速性、垂直管や曲管の通過性、防爆性を同時に満たすことが求められる。しかし、配管内部の狭隘性がロボットの推進機構に課す制約は非常に大きく、既存の機構では 100mm 以下の配管内においてこれら要件を満たすことが非常に困難であり、新たなコンセプトに基づく推進機構が必要である。

本論文は小径配管内を始めとした狭隘な環境下にて運用可能な新たな索状ロボットシステムを実現することを目的としている。すなわち、従来の推進手法に存在する課題を解決する新たな索状体推進機構、実配管におけるロボットの走行性能を向上させる推進機構と動作計画、および小径配管が接続する大空間設備の同一機構による走行を実現する推進手法を明らかにしている。本論文はこれらの研究成果を取りまとめたものであり、全編 5 章からなる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景、目的および構成を述べている。

第 2 章では、柔軟直動アクチュエータを用いた管路内高速推進機構について述べている。従来と比較して高速な推進が可能な推進様式を提案し、それに基づく運動パターンの特性を理論的に比較している。また、運動様式を実現する空圧駆動の柔軟な直動型アクチュエータ機構を示し、力学モデルの構築と試作機による実験を通して基礎特性を明らかにするとともに、アクチュエータの発生力損失の主要因を特定して設計の最適化を行っている。さらに、試作機による走行実験により、内径 53 mm の直管内にて最大平均速度 100 mm/s で走行した実験結果を示すとともに、垂直管や緩やかな曲管の通過が実現できたことを述べている。

第 3 章では、実際の管路で想定される汚れた配管や曲率の小さな曲管、不透明な配管の走行を実現するための推進機構と動作計画について述べている。汚れた配管に対しては、配管内で金属ピンを展開することで強固にロボットを保持する機構を組み込むことで走行安定性を向上させている。力学モデル構築や試作機の測定実験により機構の特性を明らかにするとともに、意図的に水分や錆、油分を付着させた配管内においても滑らずに安定走行可能なことを報告している。曲率の小さな曲管に対しては、弾性体を介したガイド部品を機構に取り付けることで曲管通過性を向上させている。曲管通過の際に機構と配管管壁の間に生じる接触力が曲管通過を阻害していることを明らかにし、ガイド部品を装着することで接触力を 38%低減できることを示している。また、曲管通過専用の動作パターンを併用することで、曲管の小さな内径 53 mm のエルボ管の通過を実現した実験結果を報告している。不透明な配管に対しては、アクチュエータ可動部の位置を推定することでオペレータの支援を必要としない推進動作の生成を可能にしている。印加する空気の流量と圧力から静的モデルを用いて可動部位置を推定する手法を示し、リアルタイムでの推定結果を実測値と比較するとともに、推定結果をロボット推進に利用することで直管内における自動推進を実現している。

第 4 章では、小径配管が接続する大空間を有する設備を、同一ロボットにより点検する機構について述べている。直動運動を生成する柔軟なアクチュエータと回転運動を生成するアクチュエータを組み合わせることで、小径配管内と開けた空間の推進を同一機構で実現する手法を示している。また、試作機を用いた種々の走行面における推進特性評価と走行実験により、提案手法によって地上に設置された小径配管内から平面上の任意の地点に向かって走行可能であることを示している。

第 5 章は結論である。

以上要するに本論文は、狭隘環境を走行可能なロボット、およびロボットの走行性を向上し適用範囲を拡張するための付随機能を詳細な研究により明らかにしたもので、応用情報科学および

ロボット工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。